

Delft

AANVULLING CURSUS M.T.V.  
HET METEN MET REKSTROOKJES

door  
D. v.d. Velden

1. INLEIDING:

In verband met sterkteberekeningen of sterktecontroles van constructies is het vaak nodig dat men de materiaalspanningen kent (trek- en drukspanningen in b.v. kg/cm<sup>2</sup>).

Deze materiaalspanningen veroorzaken zeer kleine lengteveranderingen in het materiaal. Er is zelfs een lineair verband aan te wijzen tussen deze lengteveranderingen en de materiaalspanningen.

Het rekstrookje is een middel waarmee deze lengteveranderingen bepaald kunnen worden.

Ook vindt men rekstrookjes vaak toegepast in meetinstrumenten, zoals drukdozen, versnellingsmeters, manometers. Bij deze toepassing heeft men het meetgegeven eerst "vertaald" in een lengteverandering, die dan met behulp van rekstrookjes wordt gemeten.

We zullen nu in verscheidene paragrafen de principes waarop het rekstrookje berust, de uitvoering, het plakken van rekstrookjes, enkele meetmethoden en enkele toepassingen behandelen.

2. DE WET VAN HOOKE.

De Wet van Hooke leert ons het volgende:  
Oefent men op een stuk materiaal een trek- of drukspanning uit, dan zal er een ~~relatieve~~ lengteverandering  $\Delta l$  optreden, welke evenredig is met deze spanning.

De relatieve lengteverandering ( $\frac{\Delta l}{l}$ ) is specifiek voor een materiaalsoort en dientengevolge is de uitdrukking specifieke lengteverandering ontstaan.

De Wet van Hooke zou men dus met de volgende formule kunnen beschrijven

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (1)$$

hierin is:  $\sigma$  de materiaalspanning ( $\frac{\text{kracht}}{\text{oppervlak}}$ )  $\Delta l$  de optredende lengteverandering  $l$  de lengte waarover deze lengteverandering is geconstateerd.

E een evenredigheidsfactor die van het materiaal afhangt en genoemd wordt de elasticiteitsmodulus.



### 3. DE ELASTICITEITSMODULUS E

Men heeft de constante E de elasticiteitsmodulus van het materiaal genoemd omdat het ons iets zegt over de elasticiteit van het materiaal. Als iets gemakkelijk rekt is E klein. Als het moeilijk rekt is E groot.

Welke dimensie heeft de elasticiteitsmodulus?  
Uit de dimensieformule volgt voor:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left[ \frac{K}{L^2} \right] = E \times \left[ \frac{L}{L} \right] \quad \text{dus} \quad [E] = \left[ \frac{K}{L^2} \right]$$

Ergo E is ook een spanning en wel per definitie die spanning die nodig is om het materiaal tot zijn dubbele lengte uit te rekken, mits de Wet van Hooke voortdurend zou blijven gelden. De laatste voorwaarde is in verreweg de meeste gevallen niet vervuld. Immers het materiaal zou blijvend vervormen of breken.

De elasticiteitsmodulus van staal bedraagt rond

$$2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2.$$

Andere elasticiteitsmoduli zijn b.v.:

- (rood)koper  $1,3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
  - beton  $\sim 10^5 \text{ kg/cm}^2$
  - eikenhout  $\sim 10^5 \text{ kg/cm}^2$
  - vurenhout  $\sim 10^5 \text{ kg/cm}^2$
- } in de vezelrichting
- gietijzer  $\sim 8 \text{ à } 10 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  bij drukbelasting.

### 4. VOORBEELD VAN BEREKENING VAN LENGTEVERANDERINGEN VAN STAVEN IJZER.

a) Een verticaal opgehangen stalen staaf heeft de volgende afmetingen: lengte  $l = 1000 \text{ mm}$

$$\text{breedte } b = 30 \text{ mm}$$

$$\text{hoogte } h = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Stel } E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2.$$

Gevraagd: Hoe lang wordt deze staaf als men hier een gewicht van 6000 kg aan hangt?

$$\text{Oplossing: De materiaalspanning } \sigma = \frac{6000}{2 \times 3} = 1000 \text{ kg/cm}^2$$

De Wet van Hooke luidt:

$$\sigma = E \times \frac{\Delta l}{l}$$

substitueren we hierin de bekende waarden dan volgt hieruit:

$$1000 = 2 \times 10^6 \times \frac{\Delta l}{1000}$$

$$\text{dus } \Delta l = 0,5 \text{ mm}$$

De staaf wordt dus 1000,5 mm.

b) Een stalen cilinder van 20 mm  $\phi$  heeft een lengte van 50 mm. Men plaatst hierop een gewicht van 4 ton. Gevraagd: Hoeveel mm krimpt de cilinder?

Oplossing:  $\sigma = \frac{-4 \times 10^3}{\frac{\pi}{4} \times 4} \text{ kg/cm}^2 = \frac{4 \times 10^3}{\pi} \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma = E \times \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{-4 \times 10^3}{\pi} = 2 \times 10^6 \times \frac{\Delta l}{50}$$

$$\Delta l = \frac{-2 \times 10^5}{2 \times 10^6 \times \pi} = \frac{-1}{10\pi} \text{ mm} = -0,0312 \text{ mm}$$

(Drukspanningen hebben het minteken, evenzo verkortingen)

### 5. PRINCIPE VAN HET REKSTROOKJE

Uit deze voorbeelden blijkt wel dat de lengteveranderingen die men met rekstrookjes wil gaan meten ook zeer klein zijn. Er zijn rekstrookjes die 5 mm lang zijn. In het geval van de cilinder zouden we dus hierover een verkorting meten die nog 10 x zo klein is dus 0,00312 mm of 3,12 micron.

Wat gebeurt er als we weerstandsdraad geïsoleerd op de staaf ijzer zouden plakken?

De weerstandsdraad zou meerekken. Als we een draad of een staaf rekken, dan krimpt de diameter. Omgekeerd, drukken we een staaf materiaal iets in elkaar, dan neemt de diameter toe.

We weten dat de weerstand van een draad volgt uit:

$$R = \frac{\rho l}{q} \dots \dots \dots (3)$$

waarin: R is weerstand (in ohms)

$\rho$  is specifieke weerstand uitgedrukt in ohms-per meter per mm<sup>2</sup>

$l$  is lengte van de draad in meters

$q$  is oppervlak van de doorsnede in mm<sup>2</sup>.

Als we de draad uitrekken wordt de lengte  $l + \Delta l$  en de doorsnede  $q - \Delta q$ .  $\rho$  blijft nagenoeg dezelfde dus de weerstand

$$R + \Delta R = \frac{\rho (l + \Delta l)}{q - \Delta q}$$

aangezien de toename van  $l$  en de afname van  $q$  met elkaar evenredig zijn en beide hetzelfde effect t.o.v. R sorteren, kunnen we bij zeer goede benadering schrijven:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} \dots \dots \dots (4)$$

Dit verschijnsel werd al in 1856 door Kelvin ontdekt. In 1930 werd dit in het laboratorium toegepast. In 1937 passen Simmons en Ruge dit onafhankelijk van elkaar toe op dynamometers. In 1941 en 1942 vervaardigen Simmons en Ruge bij Baldwin Locomotive Works in Amerika het SR4-rekstrookje dat in de handel verkrijgbaar is.

Philips ontwikkelde voor de oorlog koolrekstrookjes, AEG leverde ze reeds. Deze waren onnauwkeurig. Het duurde dus bijna 90 jaar voordat het oorspronkelijke principe in een handelsprodukt werd verwerkt. De evenredigheidsfactor K wordt met een lelijke naam K-factor genoemd. Deze varieert ongeveer van 2 tot 2,2, afhankelijk o.a. van de draadsoort.

Per definitie is de K-factor van een rekstrookje: het quotiënt van de relatieve weerstandsverandering van het rekstrookje en de relatieve lengteverandering die hiervan de oorzaak is.

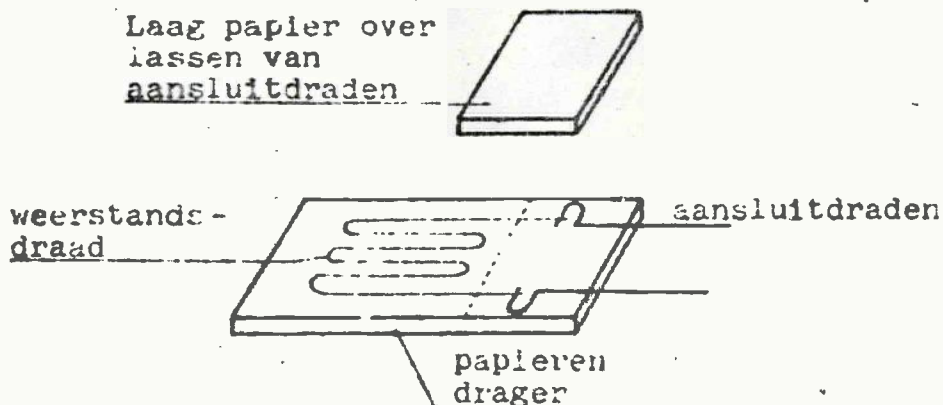
## 6. VORM VAN HET REKSTROOKJE.

Het is natuurlijk ondoenlijk om een draadje weerstandsmateriaal redelijk strak gespannen op het te beproeven materiaal te plakken. Vandaar dat men rekstrookjes vervaardigt die een weerstandsdraad bevatten die zich reeds tussen isolatiemateriaal bevindt, zodat het zonder extra isolatie-voorzorgen op het te beproeven voorwerp kan worden geplakt.

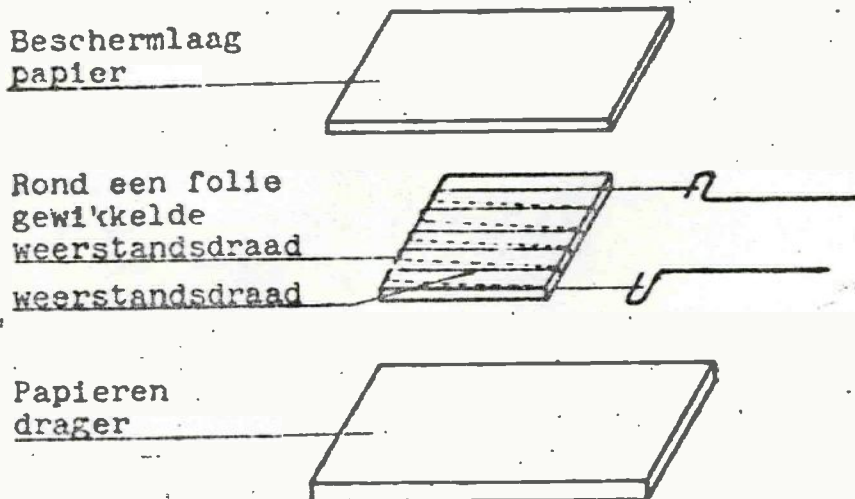
Voor redelijk nauwkeurige metingen is het gewenst dat de rekstrookjes een weerstand van  $\sim 100$  tot  $1000$  Ohm bezitten. Bij kleinere weerstanden zou het moeilijk worden de zeer kleine weerstandsveranderingen, waarom het begonnen is, te meten. Immers  $\frac{\Delta R}{R}$  is klein en meestal in de orde van grootte van enkele malen  $10^{-4}$ . Als dus  $R = 100$ , dan zal  $\Delta R$  slechts enkele honderdsten van een Ohm zijn en om die enkele honderdsten nog op 1 % nauwkeurig te kunnen meten, zal men over zeer nauwkeurige meetapparatuur dienen te beschikken.

De meest gangbare weerstandswaarden zijn: 120 Ohm en 600 Ohm.

Om deze weerstandswaarden te verwezenlijken heeft men een stuk weerstandsdraad van 5 à 20 cm lengte. Om diverse redenen, waar we hier niet op in gaan is hiervoor constantaandraad gekozen. Om het strookje nu niet te lang te maken wordt de draad zig-zag gewikkeld of om een papieren houdertje gewonden.



Figuur 2



Figuur 3

Bij de Philips papier-rekstrookjes liggen de draden gebet in een aethyl-celluloselijm. Deze lijmlaag moet evenals het papier uiterst dun zijn, aangezien het rekstrookje als het eenmaal op het te onderzoeken voorwerp is geplakt moet voldoen aan de volgende voorwaarden:

1. Het moet gemakkelijk de lengteveranderingen kunnen meemaken.
2. Het mag bij gebogen of te buigen oppervlakken slechts over een kromtestraal buigen die relatief weinig verschilt met de kromtestraal waarover het te onderzoeken materiaal buigt.

Bij de Staatsmijnen worden thans in hoofdzaak strookjes op kunstharsbasis gebruikt, die dan met een thermohardende lijmsort (b.v. Araldit) worden geplakt.

Het rekstrookje op kunstharsbasis is vervaardigd met behulp van in kunstharslijm (Araldit) gedrenkt papier, waar-tussen de weerstandsdraad zich bevindt.

Bij de vervaardiging worden de strookjes in een oventje geplaatst, terwijl ze nog in de matrijzen zijn geklemd. De voordelen van deze strookjes zijn:

1. Gemakkelijker te plakken.
2. Minder moeite met vochtisolatie daar de lijm en het strookje niet hygroscopisch zijn.
3. Bij hogere temperaturen te gebruiken en wel tot  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ .
4. Blijven ook bij grotere rekken lineair.
5. Vertonen minder kruip en hysteresis.

#### 7. HET PLAKKEN VAN REKSTROOKJES.

De plaats waarop het rekstrookje moet worden geplakt, moet mechanisch dusdanig bewerkt zijn dat deze vrij van oneffenheden, roest, vuil of iets dergelijks is.

Na de grovere bewerkingen moet men tenslotte tot zoet-vijlen overgaan, maar dan zorgen dat de bewerkingskrasjes door-elkaar lopen. Waar men de beschikking over een zandstraal apparaat heeft, verdient het aanbeveling het oppervlak tenslotte te zandstralen.

Daarna met aceton of aethyl-acetaat, die chemisch zuiver is, de fijne delen verwijderen. Hiertoe neemt men watten in een pincet en bevochtigt die met aceton of aethyl-acetaat.

Dit ter voorkoming dat ook maar het geringste spoortje vet op het metaaloppervlak komt. Aanraken met de vingers is dan ook funest.

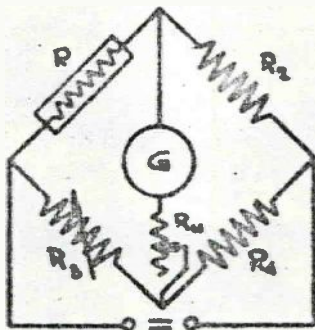
Het rekstrookje wordt ook aan de plakzijde met een van deze vloeistoffen gereinigd. Vervolgens worden zowel de meetplaats als het strookje met lijm ingesmeerd (matig, maar goed uitgestreken). Gebruikt men Araldit XV (een twee componenten lijm met oplosmiddel) dan laat men beide lijmvlakken goed drogen bij 40 à 60 °C om het oplosmiddel te verdampen. Daarna wordt het rekstrookje op zijn plaats gelegd en met behulp van een stukje rubber en een gewicht of een klem goed aangedrukt. Vervolgens laat men het enige uren op 120 à 160 °C verharden. Daarna wordt het strookje liefst nog warm afgedekt met een goede wassoort om het indringen van vocht te voorkomen.

ER ZIJ OP GEWEZEN DAT HIER SLECHTS EEN INDRUK VAN HET PLAKKEN IS GEGEVEN. VOOR PRAKTISCHE TOEPASSINGEN WENDE MEN ZICH TOT DE SPECIALISTEN OP DIT GEBIED DIE OOK DE JUISTE GEBRUIKS-AANWIJZING VAN DE LIJMSOORT KUNNEN VERSCHAFEN.

Tenslotte zorgt men voor een goede bevestiging van de aansluitsnoeren (nadat men deze aan het rekstrookje heeft gesoldeerd), op het te beproeven voorwerp. Dit ter voorkoming van beschadiging van het rekstrookje als per ongeluk aan het snoer wordt getrokken, of als bij trillende meetobjecten het snoer los zou slingeren. Deze bevestiging kan ook met een snel verharende lijmsoort geschieden.

## 8. OVERZICHT VAN ENKELE MEETMETHODEN.

Het eenvoudigst is een brug van Wheatstone bestaande uit twee vaste weerstanden, een instelbare weerstand en het rekstrookje.



Figuur 4

In bovenstaand voorbeeld

R rekstrookje = 600 Ohm

R<sub>2</sub> = 600 Ohm

R<sub>3</sub> = 1.111,0 Ohm op 0,1 Ohm instelbaar

R<sub>4</sub> = 1000 Ohm

Stel dat we het rekstrookje met  $K = 2,00$  hadden geplakt op de staaf uit ons voorbeeld a. De brug wordt in evenwicht gebracht bij onbelaste staaf. Stel dat de instelbare weerstand

op 1012,3 Ohm staat. Nu wordt de belasting aangebracht. De materiaalspanning wordt 1000 kg/cm<sup>2</sup>.

$$\sigma = E \times \frac{\Delta l}{l} \quad \text{dus} \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \times \frac{\Delta l}{l} = K \times \frac{\sigma}{E} = 2 \times \frac{10^3}{2 \times 10^6} = 10^{-3}$$

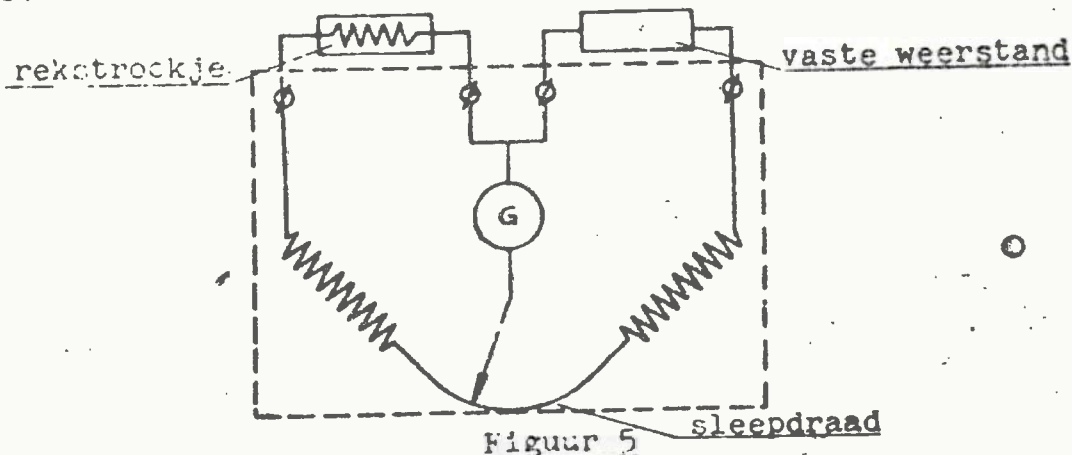
Om de brug in evenwicht te brengen moet er een toename  $\Delta R_3$  van de 1012,3  $\Omega$  plaats vinden waarbij:

$$\frac{\Delta R_3}{1012,3} = 10^{-3} \quad \text{of wel} \quad \Delta R_3 = 1,0123 \text{ Ohm.}$$

Daar we slechts met 0,1 Ohm per stap kunnen regelen kunnen we dus deze ruim 1 Ohm slechts op 10 % nauwkeurig bepalen. Vergroting van de weerstanden in de onderste tak met een factor 10, geeft een nauwkeurighheidsvergroting die zonder meer geen factor 10 is. Men zal dan nl. in de meeste gevallen de galvanometer ook een factor 10 gevoeliger moeten kiezen, en dat gaat in vele gevallen met vermindering van robuustheid gepaard.

Deze methode zou dus in het laboratorium wel uitvoerbaar zijn. Bij de draagbare handelsapparatuur lost men dit anders op en wel door een lange weerstandsdraad van b.v. 30 à 40 cm lang en met een weerstand van enkele Ohms als sleepdraad uit te voeren. Op de knop van deze sleepdraad is dan een schaalverdeling aangebracht.

Het schema ziet er dan zo uit:



De schaalverdeling kan b.v. zijn ‰ weerstandsverandering, maar ook in microreks.

Definitie :

Een microrek is een relatieve lengteverandering van  $10^{-6}$ , dus

$$\frac{\Delta l}{l} = 10^{-6}$$

Als men dus de schaal in microreks wil ijken zal men een vaste K-factor van b.v. 2,00 moeten aannemen of door middel van een

kunstgreep in het apparaat (b.v. instelbare weerstand parallel over de sleepdraad) de K-factor moeten kunnen instellen. Vrijwel alle rekmeters hebben op een of andere wijze dit principe-schema als basis. Men heeft ze met gelijkstroomvoeding en met wisselstroomvoeding. Op de voor- en nadelen hiervan komen we nog terug.

### 9. HET PASSIEVE STROOKJE (DUMMY)

In figuur 5 zien we dat de "vaste weerstand" niet in de kast is aangebracht. Dit is opzettelijk gedaan en wel om de volgende reden:

Een rekstrookje is in eerste instantie een elektr. weerstand, en dus, zoals alle elektrische weerstanden, afhankelijk van de temperatuur. Stel dat het materiaal constantaan is en een temp. coëfficiënt van  $10^{-5}$  heeft, dan zal elke graad temperatuur verschil tussen twee metingen een relatieve weerstandsverandering van  $10^{-5}$  geven. Bij  $K = 2$  zou dit als een relatieve lengteverandering van  $5 \times 10^{-6}$  of wel  $5 \mu$ rek geïnterpreteerd worden. Bij staal met een  $E$  van  $2 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup> zou dit als een mechanische spanning:

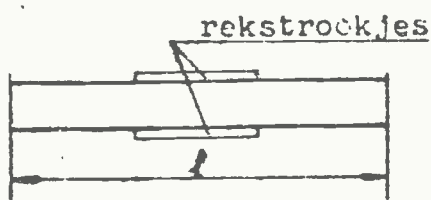
$$\sigma = E \times \frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^6 \times 5 \times 10^{-6} = 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ opgevat worden.}$$

Het is begrijpelijk dat temperatuur-variatiës van tientallen graden kunnen voorkomen aan constructies. Bij helder weer b.v. verschillen van 20 °C tussen dag en nacht, of tussen door de zon beschenen of beschaduwde constructies.

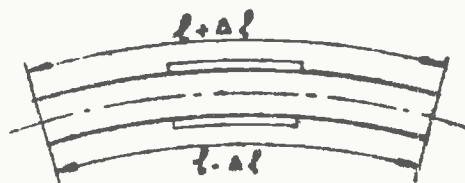
Een betrekkelijk eenvoudige oplossing is dan ook: Neem als "vaste weerstand" een rekstrookje dat op hetzelfde materiaal is geplakt als waaruit de te beproeven constructie is vervaardigd, of plak het op een constructiedeel dat dezelfde temperatuur heeft, maar gegarandeerd geen materiaalspanning vertoont. Dit PASSIEVE STROOKJE maakt dan dezelfde temperatuur-variatiës mee en zal dus ook dezelfde weerstandsvariatiës vertonen. Dit geldt echter slechts als dit strookje dezelfde temperatuurcoëfficiënt heeft als het ACTIEVE STROOKJE.  
OM HIERVAN ZEKER TE ZIJN NEME MEN STROOKJES UIT HETZELFDE PAKJE EN PLAKKE ZE OP HETZELFDE MATERIAAL.

Het is ook vaak mogelijk om als actief en passief strookje, twee actieve strookjes te nemen die echter zo geplakt worden dat de relatieve rek van het ene strookje gelijk is aan de relatieve verkorting van het andere strookje. Men vangt dan twee vliëgen in één klap nl. de invloed van temp. variatiës is gecompenseerd en de gevoeligheid is met een factor twee vermenigvuldigd.

Als voorbeeld denke men aan een dunne strip die gebogen wordt.



Figuur 6a



Figuur 6b



10. INVLOED VAN LEIDINGWEERSTAND.

De weerstand van de toevoerdraden speelt ook een rol die van groot belang is. Stel men heeft een tweetal rekstrookjes van 120 Ohm (het ene actief, het andere passief) op een rek-meter (brug van Wheatstone) aangesloten en de stand van de brug opgenomen, waarbij de galvanometer op nul staat.

Nu wil men om een of andere reden de aansluitkabels verlengen. Stel dat men hiervoor gebruikt twee-aderig snoer met een diameter van 1 mm. De weerstand per meter bedraagt dus als het koperdraad is, volgens de formule:

$$R = \rho \frac{l}{q} \quad \text{waarin } \rho = 1/57 \frac{\Omega}{\text{m/mm}^2}$$

$$R = 1/57 \times \frac{1}{\pi/4 \cdot 1^2} = 0,025 \text{ Ohm}$$

Als men nu aan het ene rekstrookje 10 meter en aan het andere 9 meter snoer bevestigt, dan wordt de weerstand van het ene strookje met  $20 \times 0,025 \text{ Ohm} = 0,5 \text{ Ohm}$  vergroot en van het andere met  $18 \times 0,025 = 0,45 \text{ Ohm}$  vergroot. Er ontstaat dus een miswijzing van 0,05 Ohm. We zouden dus als we nu opnieuw de brug op nul zouden instellen een verschil vinden overeenkomend met  $\frac{\Delta R}{R} = \frac{0,05}{120} = 4,17 \times 10^{-4}$ . Dit komt bij  $K = 2$  overeen met een relatieve lengteverandering van  $\frac{4,17 \times 10^{-4}}{2} = 2,085 \times 10^{-4}$ . Dit is dus 208,5  $\mu$ rek.

Als we beseffen dat aan constructies zelden lengteveranderingen boven 500 microrek worden gemeten, dan is het duidelijk dat men altijd de nulstand moet bepalen met de definitieve kabellengte en dat men deze nooit mag veranderen of verwisselen.

11. INVLOED VAN DE TEMPERATUUR OP DE LEIDINGWEERSTAND.

Zoals bekend, varieert de weerstand van koper met 0,004 Ohm per Ohm per  $^{\circ}\text{C}$ . Als we dus 10 m twee-aderig snoer met een draaddiam. van 1 mm hebben aangesloten en het ene snoer heeft een gem. temp. van  $19^{\circ}\text{C}$  en het andere  $20^{\circ}\text{C}$  dan bedraagt de weerstand van:

het ene snoer  $0,5 (1 + 20 \times 0,004)$   
 en van het andere snoer  $0,5 (1 + 19 \times 0,004)$ .  
 Het verschil, dus  $\frac{0,5}{0,5} \times 1 \times 0,004 = 0,002 \text{ Ohm}$  wordt  
 dan als lengteverandering van het rekstrookje geïnterpreteerd  
 en wel als volgt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0,002}{120} = 16,6 \times 10^{-6}$$

$$\text{bij } K = 2 \text{ is dus } \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R}{R} = 8,3 \times 10^{-6} = 8,3 \text{ microrek.}$$

Remedie: bundel de kabels zodanig dat ze zo goed mogelijk gelijke temperaturen krijgen, of gebruik vieraderige kabel.

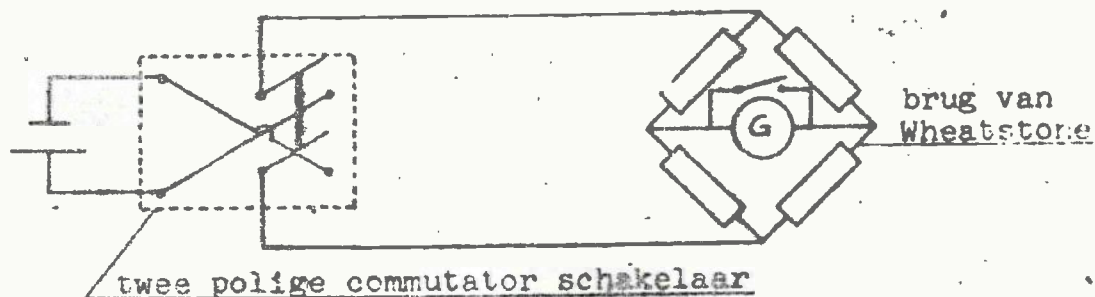
## 12. INVLOED VAN TEMPERATUUR OP CONTACTPUNTEN.

In een circuit zoals de brug van Wheatstone er een is, bevinden zich verscheidene contactplaatsen waar van de ene soort materiaal op de andere wordt overgegaan. Als de contactplaatsen niet alle dezelfde temperatuur hebben ontstaat er een thermo e.m.k. Deze doet de galvanometer uitslaan, terwijl de brug qua weerstandsverhouding feitelijk in evenwicht is.

Conclusie: Men gaat de brug daarna fout instellen om de galvanometer op nul te krijgen.

Remedie: Verwissel de stroomtoevoerdraden aan de knoppen van de rekmeter zodat de stroom van richting omkeert en stel opnieuw in. Middel de gevonden aflezingen van de brug om de juiste waarde te vinden.

Men kan dit praktisch uitvoeren met een z.g. commutator-schakelaar. Zie onderstaande figuur.

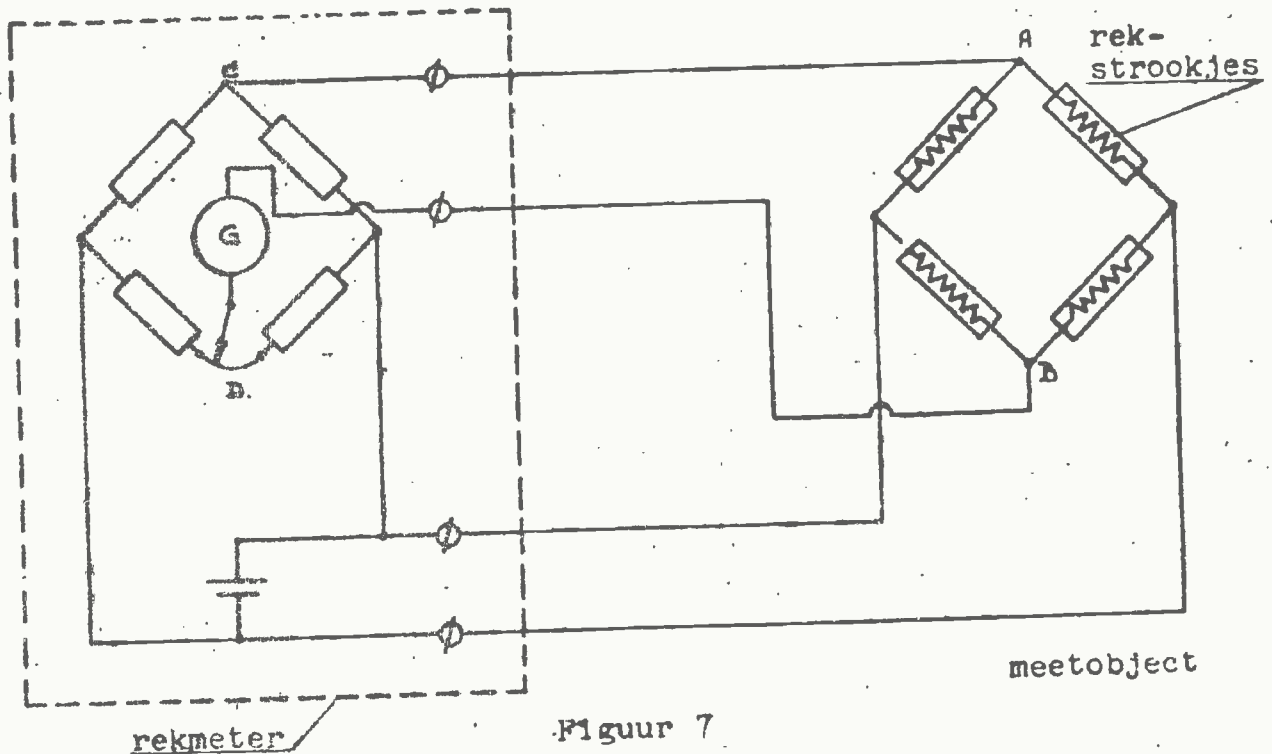


Het verdient aanbeveling, om bij bruggen die zelfinductie en capaciteiten bevatten, (lange toevoerdraden) de galvanometer tijdens het commuteren kort te sluiten.

Een andere remedie luidt: Gebruik een wisselstroombrug als rekmeter. Als men daarbij bedenkt dat de galvanometer daar ook een wisselstroominstrument moet zijn (i.c. een elektronische spanningsversterker) dat niet voor gelijkspanningen gevoelig is, dan zullen deze thermospanningen dus ook niet van invloed zijn.

## 13. HET METEN MET COMPLETE BRUGGEN VAN REKSTROOKJES.

De fouten die in par. 10 en par. 11 zijn genoemd zijn moeilijk en nooit geheel op te heffen. Een oplossing hiervoor vindt men door met gehele bruggen van rekstroomkjes te werken en die op een rekmeter aan te sluiten, die ook uit een gehele brug bestaat en wel als volgt:



Figuur 7

Het valt door middel van redenering gemakkelijk te begrijpen dat als A en B dezelfde spanning hebben ook C en D dezelfde spanning moeten hebben, wil de galvanometer op nul staan. Als A en B 1 mV in spanning verschillen, dan moeten ook C en D 1 mV in spanning verschillen, wil de galvanometer nul aanwijzen. Met andere woorden, de rekmeter moet evenveel uit balans worden gebracht als de brug van rekstrookjes. De totale fout die nu gemaakt wordt bij een verschil van de aflezingen in belaste en onbelaste toestand van de rekstrookjes

is  $\frac{R_l}{R_R} \times 100 \%$ , hierin is  $R_l$  de weerstand van de twee stroomtoevoerdraden en  $R_R$  de substitutieweerstand van de gehele brug van rekstrookjes.

In het geval van ons voorbeeld van 10 m twee-aderig snoer met een diameter van 1,0 mm is deze fout

$$\frac{0,5}{600} \times 100 \% = 0,083 \%, \text{ dus } < 1 \text{ ‰ bij rekstrookjes van}$$

600 Ohm. Bij rekstrookjes van 120 Ohm had deze fout 0,42 % bedragen.

Temp. variaties van de leiding kunnen nu rustig buiten beschouwing blijven, daar de weerstandsvariaties die hiervan het gevolg zijn, hoogstens enkele procenten van die 0,083 % of 0,42 % bedragen.

Een ander voordeel is dat, wanneer we op verscheidene plaatsen moeten meten we nu gemakkelijk van een vierpolige omschakelaar gebruik kunnen maken van normale kwaliteit.

Zou men dit met halve bruggen doen, dan komen de contact-overgangsweerstanden rechtstreeks in serie met de rekstrookjes te staan, wat tot aanzienlijke fouten aanleiding geeft.

Als laatste voordeel kan nog genoemd worden dat als we met hele bruggen werken waarin twee actieve strookjes diagonaal-gewijze tegenover elkaar geschakeld zijn de gevoeligheid tweemaal zo groot wordt als bij een halve brug, bestaande uit één actief en één passief strookje.

Samenvattend kunnen we dus de voordelen van het werken met hele bruggen noemen:

1. Kabelweerstand is van zeer geringe invloed en bovendien in de verwerking van de meetresultaten in rekening te brengen.
2. Temp. verandering van de kabels is van onmerkbare invloed.
3. Bij meerpuntsmetingen hebben we geen last van de overgangscontacten in de meetpuntschakelaars.
4. Vaak is de gevoeligheid tweemaal zo groot als bij halve bruggen.

#### 14. HET METEN VAN DYNAMISCHE VERSCHIJNSELEN

Tot dusver hebben we ons bezig gehouden met metingen van quasi-statische verschijnselen. We zouden dit kunnen uitdrukken als verschijnselen die, gedurende de tijd die we nodig hebben om een meting te verrichten, niet meetbaar veranderen.

Is dit echter wel het geval dan spreken we van dynamische verschijnselen. In dat geval kunnen we de sleepdraadweerstand niet afstellen om de galvanometer op nul te houden, maar staat het sleepcontact vast en slaat de galvanometer variërend uit.

In plaats van de galvanometer zal men dan heel vaak een versterker plus een registrerend instrument gebruiken (lusoscillograaf, potentiometerrecorder, etc.). Met de eerste kan men dan zelfs zeer snelle verschijnselen met frequenties van enkele honderden perioden per seconde registreren.

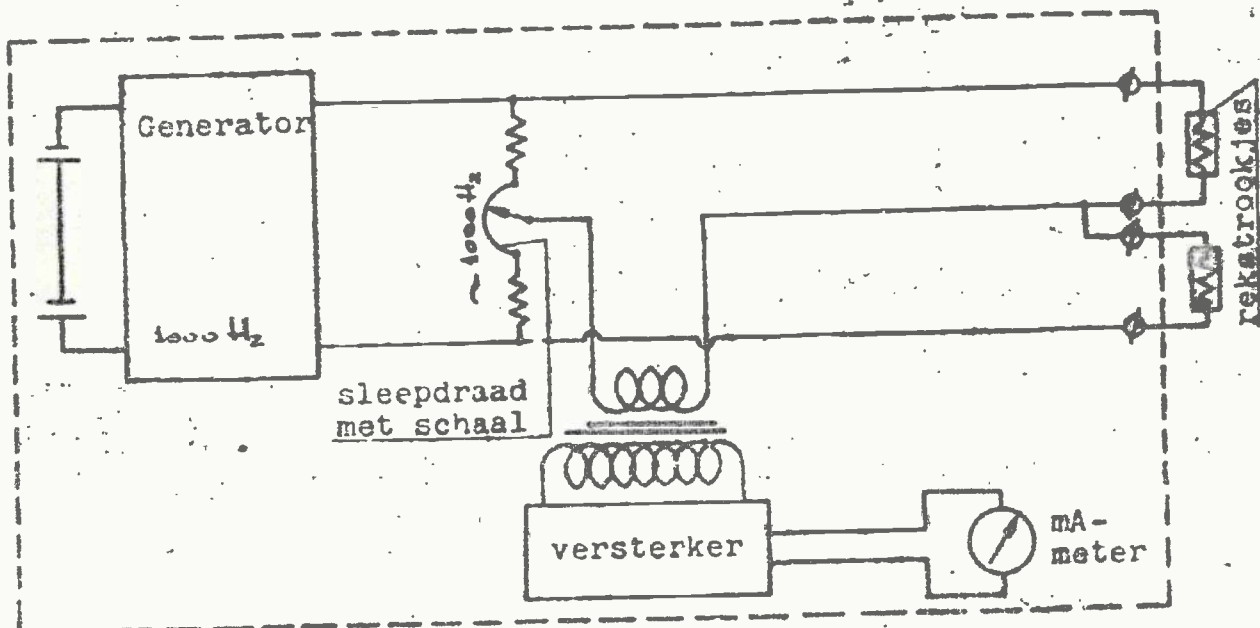
#### 15. HET GEBRUIK VAN REKMETERS DIE DE REKSTROOKJES MET WISSELSTROOM VOEDEN.

We hebben in par. 12 gezien dat thermo-contactpotentialen een bron van fouten kan zijn die geëlimineerd kan worden door het gebruik van wisselstroom-rekmeters.

Derhalve worden dan ook heel vaak wisselstroomrekmeters gebruikt (b.v. Peekel rekmetr). Deze rekmeters, die vaak met batterijen kunnen worden gevoed, bevatten een buisgenerator, die een wisselspanning van b.v. 1000 Hz, 10 Volt en 10 mA kunnen opwekken. Deze wisselspanning wordt aan de rekstrookjes toegevoerd, de rest van het instrument is een brug van Wheatstone.

Als galvanometer fungeert een wisselstroomversterker (elektronenbuizen) die de spanning, welke bij onbalans ontstaat, versterkt en op een mA-meter zichtbaar maakt. Staat deze meter op nul, dan is de brug in evenwicht. De sleepdraad is weer voorzien van een schaalverdeling in b.v. microreks.

BLOKSCHEMA



Figuur 8

Het is bij dit type brug ook mogelijk met gehele rekstrookbruggen te werken. Er is een extra stel aansluitknoppen, waarbij de schakeling inwendig is aangepast aan het meten met hele brugger.

Een belangrijk voordeel van het meten met wisselstroom is bovendien dat de mA-meter die samen met de elektronische versterker als nulinstrument fungeert, veel robuuster van uitvoering is dan een gevoelige galvanometer.

Een nadeel is echter dat bij wisselstroommetingen hinder wordt ondervonden van de capaciteit (en in geringe mate van de zelfinductie) die de snoeren t.o.v. elkaar bezitten. Er zijn vaak voorzieningen getroffen om deze invloeden uit te schakelen of te verminderen, maar men moet vooral bij iets langere meetkabels (meer dan 5 meter) altijd opletten dat men geen fouten maakt. Een duidelijke indicatie dat men op weg is fouten te maken vormt de grotere traagheid waarmee de mA-meter reageert.

Het hangt dus enigszins van de omstandigheden af of men een gelijkstroom - dan wel een wisselstroommethode zal toepassen.

16. TOEPASSINGEN VAN REKSTROOKJES

Zoals reeds in de inleiding opgemerkt kan men de rekstrookjes gebruiken voor het meten van materiaalspanningen in constructies.

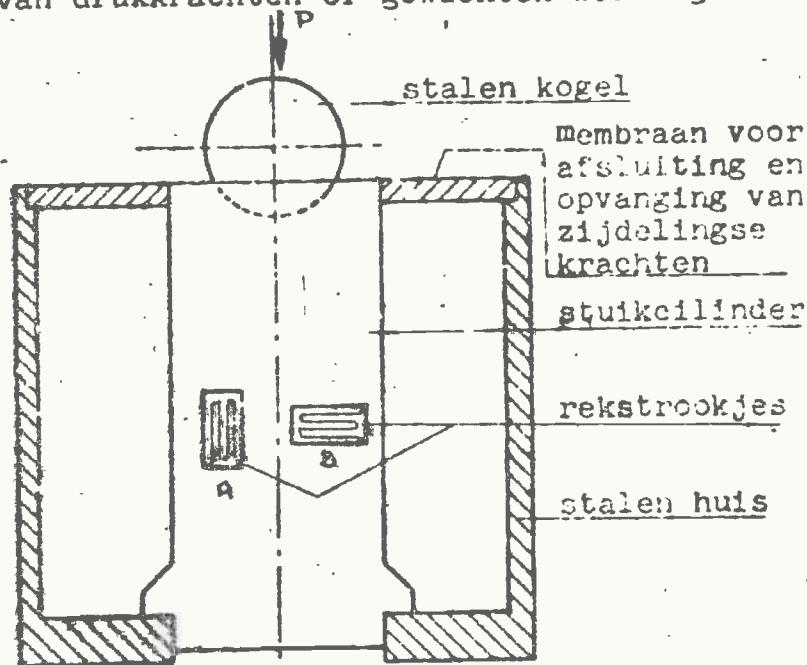
Een minstens even belangrijke toepassing is het gebruik van rekstrookjes in meetapparatuur. Daar waar men het meetgegeven in kleine lengteveranderingen kan transformeren worden meer en meer instrumenten met rekstrookjes toegepast. Voorbeelden: Manometers met membranen beplakt met rekstrookjes voor het meten van snel variërende drukken.

Dynamometers (vaak ten onrechte drukdozen genoemd) voor het meten van drukkrachten of gewichten. Deze bestaan ook als trekkrachtmeters.

Versnellingsmeters, hellingmeters etc.

Deze instrumenten zijn als handelsapparaat met bijpassende meters en schrijvers te verkrijgen.

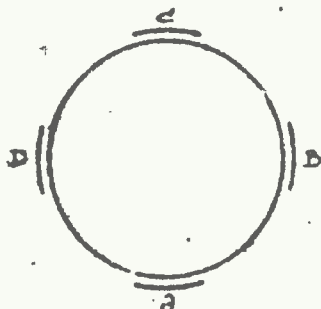
We zullen hier een type dynamometer bespreken dat vaak voor het meten van drukkrachten of gewichten wordt gebruikt:



Figuur 9

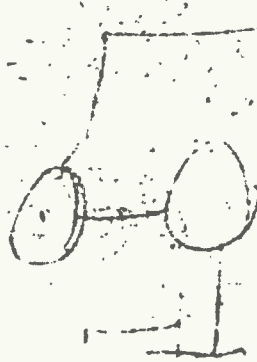
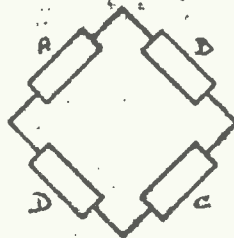
Een stalen kogel ligt vrij in een uitholling van een stuikstaaf. De straal van deze uitholling is iets groter dan die van de stalen kogel. Hiermee bereikt men dat de kracht P centriscch op de stuikcilinder werkt. Deze kracht P zal de stuikcilinder een weinig verkorten en iets in diameter doen toenemen.

De relatieve verkorting wordt gemeten met rekstrookje A en de relatieve verbreding met rekstrookje B (zie fig.9). Diametraal tegenover A zit rekstrookje C, ook verticaal en diametraal tegenover B zit strookje D horizontaal. (fig. 10).



Figuur 10

Door de brugschakeling inwendig zo te maken als fig. 11 weergeeft, verkrijgt men de hoogste gevoeligheid en profiteert men van alle voordelen die complete brugschakelingen bieden.



Figuur 11

In de dynamometer bevinden zich verschillende justeerweerstandsen voor temp. comp., uitwisselbaarheid, van de drukdozen en nulpuntinstelling.

Dergelijke "drukdozen" kan men thans vervaardigen variërend van 1 tot 2500 ton nominale belasting.

Ze worden gebruikt in walsbedrijven, voor weging van wagons, vloeistoftanks, etc.

#### 17. SLOTOPMERKING

Hoewel het rekstrookje aanvankelijk (direct na de oorlog) in een kwade reuk stond wat zijn betrouwbaarheid betref, is men langzamerhand de techniek van plakken, afwerken enz. steeds meer meester geworden. Dit heeft tot resultaat gehad dat zowel metingen als meetinstrumenten, waarbij gebruik gemaakt wordt van rekstrookjes, steeds meer veld winnen.

Dit neemt niet weg dat men bij het stellen van hoge nauwkeurigheidseisen aan vele voorwaarden moet kunnen voldoen. Indien men van nauwkeurigheid van meting op 1 microrek spreekt, betekent dit voor rekstrookjes van 120 Ohm weerstandsvariatie:

$$\Delta R = K \times \frac{\Delta l}{l} \times R = 2 \times 10^{-6} \times 120 = 0,00024 \text{ Ohm.}$$

Alle storende invloeden in het meetcircuit moeten beneden deze waarde blijven.

Verschuiven als hysteresis, kruip, elastische nawerking, die we hier buiten behandeling laten, mogen dus relatieve lengteveranderingen van  $10^{-9}$  niet overschrijden.

Dit overwegende zal men begrijpen dat het plakken van en meten met rekstrookjes specialistenwerk is, dat slechts met behulp van uiterste zorgvuldigheid en ervaring kan worden verricht.